



Alokasi Sumberdaya Air Berdasarkan Kriteria Ekonomi Menggunakan Aplikasi Aquarius (Studi kasus: SubDAS Ambang-Brantas, Indonesia)

Water Allocation Based on Economic Criteria Using Aquarius Model (A Case Study in Ambang-Brantas subbasin, Indonesia)

I Putu Santikayasa^{1*}, Agis² dan Siti Maesaroh¹

¹Departemen Geofisika dan Meteorologi, Gedung FMIPA, IPB, Jl. Meranti Wing 19 Lv.4 Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

²Sustainability Division, PT Globalindo Alam Perkasa, Musim Mas Group

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 March 2017

Received in revised from 29 August 2017

Accepted 4 December 2017

doi: 10.29244/j.agromet.31.2.89-102

Keywords:

Benefit function
Hydrological modeling
Model optimization
Water allocation
Water demand

ABSTRACT

The use of economic approach on water allocation are inclusively becoming integrated on water resource management. Competing among water users is expected to escalate due to increasing water demand despite of limited water availability. This research used economic approach aiming to optimize water allocation in Ambang-Brantas subbasin, Malang, and to calculate the total benefit for different sectors of allocated water. We distinguished two scenarios (2012–2015 and 2016–2035) to reflect the existing and the future water allocation. We modelled the water allocation with the Aquarius application. In this subbasin, three main sectors of water users were identified i.e. domestic, agriculture, and industries. The results showed that the agricultural sector was the highest water demand compared to other sectors. This finding was consistent both monthly and annually. Our findings revealed that industries sector show the maximum benefit per unit water used. Based on the scenario, either a decreasing water availability by 10% or an increasing water demand by 10% will decline the total benefit by 44%. If we increase the scenario to 20% it will reduce the total benefit until 71%. This modelling exercise using Aquarius application shows that the model is a promising tool for water resource management with integration of economic approach.

PENDAHULUAN

Alokasi air memiliki peran penting dalam pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) berkelanjutan (Braude et al., 2015; Zhou et al., 2015). DAS yang merupakan suatu unit ekosistem perlu dikelola dalam upaya pembangunan berkelanjutan serta pemenuhan air untuk kebutuhan hidup masyarakat di wilayah tersebut. Pengelolaan DAS perlu direncanakan dan diarahkan untuk mendapatkan pola pengelolaan yang tetap lestari baik untuk saat ini maupun di masa mendatang (Giordano dan Shah, 2014; Vaghefi et al., 2015). DAS sebagai suatu ekosistem memberikan layanan jasa lingkungan (Qiu dan Turner, 2013; Rodríguez-de-Francisco dan Budds, 2015; Su et al., 2012) terutama pada penyediaan air untuk wilayah tersebut sehingga memerlukan pengelolaan yang baik untuk menjaga keberlanjutan fungsinya.

Sumberdaya air di SubDAS Ambang-Brantas Kabupaten Malang memiliki potensi yang sangat tinggi namun memerlukan pengelolaan yang tepat untuk menjaga kelestariannya. Hal ini disebabkan karena kebutuhan air yang terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan penduduk (Braude et al., 2015; Dawadi dan Ahmad, 2013), namun tidak diikuti oleh peningkatan ketersediaan air (Mekonnen dan Hoekstra, 2016; Pedro-Monzonis et al., 2015). Selain itu, pertumbuhan penduduk serta peningkatan standar hidup, urbanisasi, dan pertumbuhan industri menyebabkan peningkatan kebutuhan air untuk pemenuhan kebutuhan-kebutuhan dasar tersebut (Dessu et al., 2014; Divakar et al., 2011; Ouda, 2014). Penggunaan air yang beragam menyebabkan peningkatan pada permintaan, kompetisi dalam penggunaan, dan konflik antar sektor pengguna air

* Corresponding author: psantika@gmail.com

(Dinar et al., 2015; Flörke et al., 2013; Grouillet et al., 2015). Secara umum, ketersediaan air di DAS Brantas dikategorikan aman dalam pemenuhan kebutuhan air di Kabupaten Malang, namun cenderung mengalami defisit air pada musim kemarau yang panjang. Hal tersebut mendorong keperluan pengelolaan termasuk juga pengalokasian air yang tepat dalam upaya mendapatkan manfaat ekonomi (*benefit*) maksimal baik dari segi ekonomi, lingkungan maupun sosial (Li dan Guo, 2014).

Pemanfaatan air di wilayah subDAS Ambang-Brantas digunakan untuk pemenuhan air pada sektor domestik, pertanian, dan industri. Alokasi air kepada ketiga sektor tersebut sesuai dengan kebutuhan pada masing-masing sektor serta ketersediaan air (Fotakis dan Sidiropoulos, 2014; Xuan et al., 2012). Pola alokasi pada ketiga sektor tersebut tidak mempertimbangkan komponen ekonomi sebagai bagian dari proses alokasi. Namun demikian, melihat pola perubahan kebutuhan air dan juga ketersediaan air, pengelolaan air pada subDAS Ambang-Brantas perlu mempertimbangkan aspek ekonomi sebagai upaya untuk mendapatkan nilai ekonomi maksimum (Mesa-Jurado et al., 2012; Roozbahani et al., 2015) dari ketersediaan air pada wilayah tersebut.

Alokasi air bagi kesejahteraan orang banyak dapat diciptakan dengan melibatkan berbagai instrumen yang mendorong pemanfaatan sumberdaya itu secara efektif dan efisien (Hoekstra, 2014; Pahl-Wostl et al., 2013). Selain pengembangan perangkat kelembagaan untuk mengelola air, berbagai literatur dalam pengelolaan sumberdaya (Ejaz Qureshi et al., 2013; Graveline, 2016; Rey et al., 2016) menyarankan

instrumen ekonomi digunakan sebagai instrumen pengelolaan yang mendorong pembentukan alokasi air optimal. Secara praktis penerapan instrumen ekonomi dalam pengelolaan sumberdaya air merupakan suatu teknik pembebanan biaya kepada para pengguna agar alokasi air dapat dimanfaatkan secara bijak. Teknik alokasi tersebut dapat dilakukan dengan cara pengelolaan kebutuhan air dan menentukan harga air. Diaz dan Brown (1997) menyatakan bahwa dalam upaya mengoptimalkan air yang dialokasikan pada suatu wilayah dapat menggunakan fungsi/kriteria manfaat ekonomi yang didasarkan pada teori permintaan *Marshallian*. Dalam studi tersebut, alokasi air dioptimalkan berdasarkan pada jumlah air yang tersedia dan nilai ekonomi yang dihasilkan oleh masing-masing sektor.

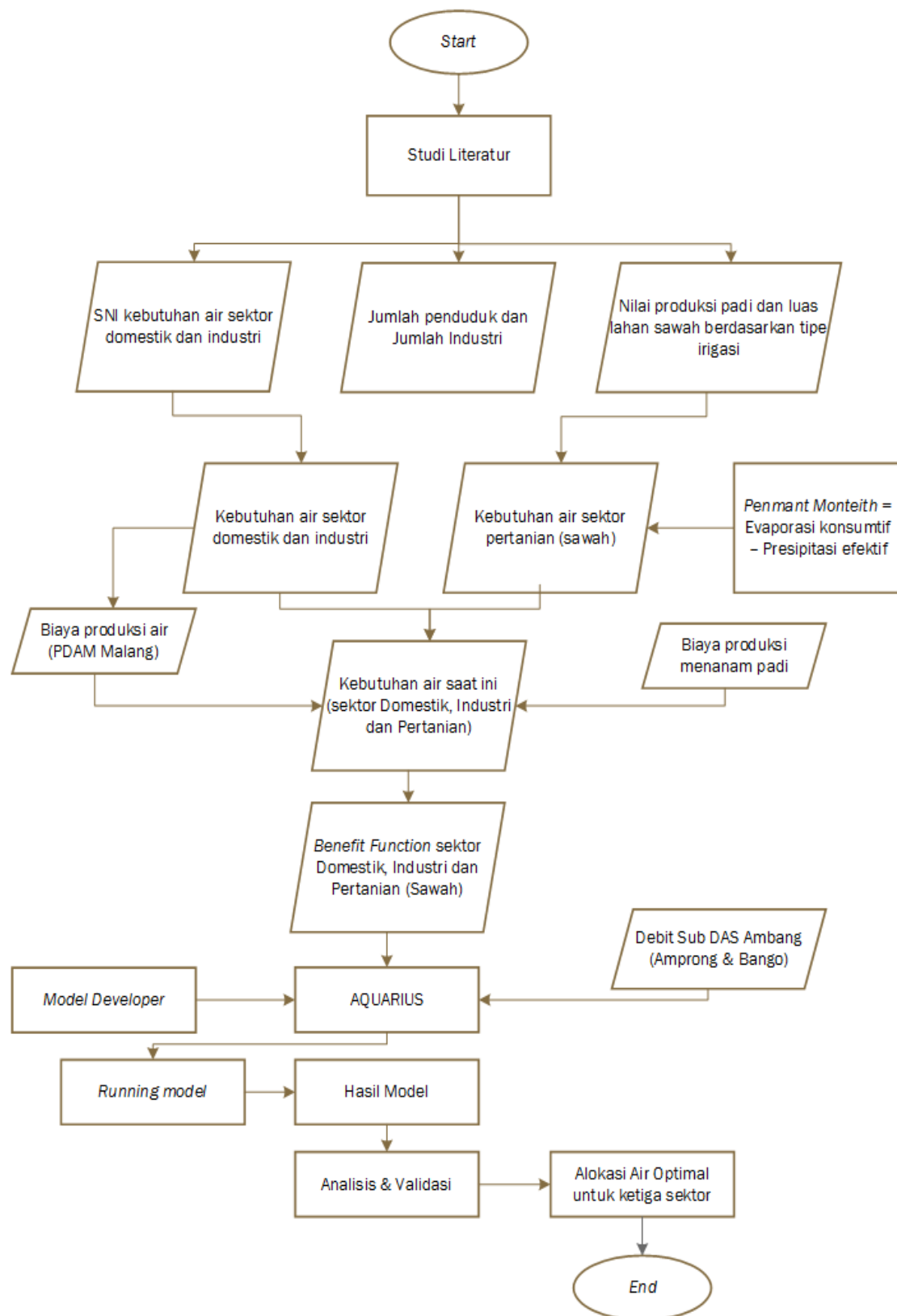
Penelitian ini bertujuan untuk: (i) mengevaluasi alokasi sumberdaya air menggunakan pendekatan ekonomi pada tiga sektor utama (domestik, pertanian, dan industri) di wilayah SubDAS Ambang-Brantas, Kabupaten Malang, dan (ii) mengevaluasi skenario dampak perubahan ketersediaan sumberdaya air terhadap alokasi di masa yang akan datang.

METODE PENELITIAN

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data ketersediaan air subDAS Ambang-Brantas, data sosial ekonomi dalam penyusunan nilai kebutuhan air serta data curah hujan dan suhu. Seluruh data yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan seperti yang diuraikan pada diagram alir penelitian (Gambar 1).

Tabel 1 Jenis, sumber dan periode data penelitian

Data	Sumber	Periode
Standar Nasional Indonesia (SNI) kebutuhan air sektor domestik dan industri	Badan Standardisasi Nasional (BSN) tentang SNI kebutuhan air	Data harian
Jumlah penduduk	Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Malang	Data bulanan selama 5 tahun (2010-2015)
Jumlah industri		
Luas lahan sawah menurut jenis irigasi		
Nilai produksi padi IR-64	Website online PDAM Kabupaten Malang	Data 5 tahun terakhir (2010-2015)
Biaya produksi air PDAM Kabupaten Malang		
Curah hujan	Website online Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan data reanalisis dari <i>Climate data Library</i> (website IRI/LDEO)	Data harian (2005-2015)
Suhu		
Debit di DAS Brantas Hulu yaitu SubDAS Ambang (Amprong dan Bango).	Laporan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Brantas / Dinas Pekerjaan Umum.	Data harian (2012-2015)



Gambar 1 Kerangka kerja perhitungan alokasi sumber daya air berdasarkan kriteria ekonomi menggunakan aplikasi Aquarius

Perhitungan Kebutuhan air sektor Domestik dan Industri

Kebutuhan air sektor domestik (WD_d) harian diduga dengan menggunakan data jumlah penduduk (X_p) dan Standar Nasional Indonesia kebutuhan air

domestik harian (SNI_d) (Tabel 2). Akumulasi kebutuhan air bulanan diperoleh dari akumulasi kebutuhan air harian dikalikan dengan jumlah hari dalam satu bulan (M_n) (Persamaan 1).

$$WD_d = X_p \times SNI_d \times M_n \quad (1)$$

Tabel 2 Kebutuhan air domestik per orang per hari menurut SNI

Kategori Kota	Jumlah penduduk (Ribu Jiwa)	Kebutuhan air bersih (L/O/H)
Semi urban	3 – 20	60 – 90
Kota kecil	20 – 100	90 – 110
Kota sedang	100 – 500	100 – 125
Kota besar	500 – 1000	120 – 150
Metropolitan	> 1000	150 – 200

Sumber: Pedoman Perencanaan Sumberdaya Air Wilayah Sungai, Direktorat Jenderal Sumberdaya Air, SNI 6728.1:2015.

Sejalan dengan kebutuhan air domestik, kebutuhan air industri (WD_i) harian diduga dengan menggunakan informasi jumlah industri (X_i) dan standar nasional indonesia kebutuhan air industri (SNI_i) (Tabel 3). Akumulasi kebutuhan air bulanan diduga

dengan mengalikan jumlah kebutuhan air industri harian dengan jumlah hari pada satu bulan (M_n) (Persamaan 2).

$$WD_i = X_p \times SNI_i \times M_n \quad (2)$$

Tabel 3 Kebutuhan Air Industri Berdasarkan Proses Industri

Jenis Industri	Jenis Proses Industri	Kebutuhan Air (L/Hari)
Industri Rumah Tangga	Belum ada, rekomendasi dapat disesuaikan dengan kebutuhan air rumah tangga	
Industri Kecil		
Industri Sedang	Minuman ringan	1.600 – 11.200
	Industri es	18.000 – 67.000
	Kecap	12.000 – 97.000
Industri Besar	Minuman ringan	65.000 – 78 Juta
	Industri pembekuan ikan dan biota perairan lainnya	225.000 – 1,35 Juta
Industri Tekstil	Proses pengolahan tekstil	400 – 700 l/kapita/hari

Sumber: Pedoman Perencanaan Sumberdaya Air Wilayah Sungai, Direktorat Jenderal Sumberdaya Air (SNI 6728.1:2015) (Dirjen SDA, 2015).

Sedangkan untuk kebutuhan air pertanian di lahan pertanian diduga dengan menggunakan persamaan evapotranspirasi tanaman (ET_c) (Persamaan 3) yang dihitung dengan mengalikan nilai evapotranspirasi acuan (ET_0) dengan koefisien tanaman sesuai jenis dan pertumbuhan vegetasinya (K_c). ET_c dan ET_0 dihitung dalam satuan mm/hari.

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (3)$$

ET_0 dalam penelitian ini dihitung dengan menggunakan perhitungan PM- ET_0 (Allen et al., 1998)

Penyusunan fungsi manfaat (*benefit function*)

Fungsi manfaat sektor disusun berdasarkan hubungan antara nilai keuntungan (*benefit*) dengan jumlah air yang dialokasikan untuk sektor tersebut. Ada beragam pendekatan yang bisa digunakan untuk menghitung fungsi manfaat ekonomi seperti

pendekatan pasar langsung (*direct market approaches*) (Young, 2010), pasar tidak langsung (*indirect market approaches*), *residual imputation approach*, *value added* dan *mathematical programming* (Turner et al., 2004). Referensi terkait dengan perhitungan fungsi manfaat untuk wilayah penelitian sangat sulit untuk diperoleh sehingga pada penelitian ini fungsi manfaat menggunakan pendekatan kurva permintaan dan harga air per meter kubik yang dihubungkan dengan total biaya pengelolaan baik kualitas maupun kuantitas air dari sumber sampai dengan diterima oleh konsumen. Setiap meter kubik air yang diambil dari bendung, dihitung total biaya pengelolaan yang diperlukan kemudian total nilai ini digunakan sebagai pengurang dari pendapatan pengelola dalam mendistribusikan air kepada pengguna. Perhitungan fungsi manfaat untuk sektor pertanian dilakukan dengan menggunakan model simulasi tanaman untuk

menghitung kebutuhan air pertanian. Lahan pertanian pada penelitian ini dibatasi hanya pada lahan pertanian yang memiliki saluran irigasi.

Penyusunan model alokasi air dengan Aquarius

Pada penelitian ini pemodelan alokasi air disusun dengan menggunakan aplikasi model Aquarius. Aquarius sebagai suatu model alokasi air berbasis komputer yang mampu memodelkan alokasi air baik secara spasial maupun temporal pada suatu DAS (Diaz dan Brown, 1997; Ren et al., 2016). Pemodelan dengan Aquarius akan melakukan iterasi untuk menghitung nilai efisiensi ekonomi dari sistem sampai diperoleh nilai manfaat keuntungan marginal bersih (*net-marginal benefit*) sama untuk keseluruhan sektor (Mullick et al., 2015). Kemudian keseluruhan permintaan air digambarkan dengan menggunakan kurva permintaan dan keuntungan marginal baik secara eksponensial, linear maupun konstan. Permasalahan optimasi alokasi air ini mampu diselesaikan dengan menggunakan pemodelan yang menggunakan total nilai manfaat ekonomi maksimum sebagai fungsi tujuan (Divakar et al., 2011; Mullick et al., 2013).

Skenario perubahan ketersediaan air

Setelah model alokasi air menggunakan aplikasi Aquarius tersusun, langkah lanjutan adalah mengevaluasi alokasi air berdasarkan perubahan ketersediaan maupun permintaan air. Skenario disusun dengan: (1) mengubah nilai ketersediaan air mengalami penurunan 10% dan 20%, (2) kenaikan permintaan air pada masing-masing sektor sebesar 10 dan 20% dari kondisi semula sebagai deskripsi terhadap kondisi pada periode tahun 2016-2035. Nilai skenario tersebut digunakan berdasarkan asumsi terjadi penurunan ketersediaan dan peningkatan kebutuhan air akibat adanya pertumbuhan penduduk dan industri. Sedangkan nilai 10% dan 20% digunakan dengan pertimbangan praktis sekaligus melihat sensitivitas alokasi terhadap perubahan baik perubahan pada ketersediaan maupun kebutuhan air. Asumsi yang digunakan dalam skenario ini adalah fungsi manfaat ekonomi dari setiap sektor pada masing-masing skenario tidak mengalami perubahan dibandingkan dengan kondisi saat ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Wilayah kajian

Kabupaten Malang merupakan wilayah dengan topografi berupa dataran tinggi yang dikelilingi oleh pegunungan dan dataran rendah atau daerah lembah pada ketinggian 250-500 meter di atas permukaan laut

(mdpl). Daerah dataran tinggi yang terletak di bagian selatan merupakan daerah perbukitan *karst* (Pegunungan Kendeng) pada ketinggian 0-650 meter dpl, daerah lereng Tengger-Semeru di bagian timur membujur dari utara ke selatan pada ketinggian 500–3600 mdpl dan daerah lereng Kawi-Arjuno di bagian barat pada ketinggian 500–3300 mdpl.

Kondisi iklim wilayah kajian diidentifikasi berdasarkan data dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Pola curah hujan bulanan wilayah kajian termasuk kategori monsunial dengan puncak hujan pada bulan Desember-Februari dan musim kering pada bulan Juni-September. Selama periode 2005-2015, tercatat rerata curah hujan tahunan sebesar 4000 mm, dan tahun 2010 merupakan tahun dengan curah hujan tertinggi selama periode 10 tahun tersebut. Sedangkan suhu maksimum berdasarkan data pada tahun 2005–2010 tercatat sebesar 26.8 °C, dan suhu minimum sebesar 21.6 °C. Kelembaban udara di wilayah ini berkisar antara 66%–91%. Rata-rata kecepatan angin pada ketiga pos stasiun pengamat antara 1.8–4.7 km/jam.

Jumlah penduduk di wilayah kajian sejumlah 2.5 juta jiwa (dengan proporsi laki-laki 50.2% dan perempuan 49.8%). Kepadatan penduduk secara rata-rata tercatat 880 jiwa/km² dengan kepadatan tertinggi di wilayah Kecamatan Kepanjen, Pakisaji dan Pakis dengan kepadatan >2000 jiwa/km². Sebagian besar penduduk memenuhi kebutuhan air menggunakan air yang berasal dari Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) melalui sekitar 68 ribu sambungan rumah yang tersebar di 25 Unit Pelayanan dari total 33 Kecamatan yang ada di wilayah Kabupaten Malang. Berdasarkan data dari PDAM, perusahaan air negara ini sebagai pengelola air minum daerah mampu menghasilkan pendapatan sebesar 46.5 miliar rupiah (2011) meningkat dibandingkan pendapatan pada tahun 2010 sebesar 40.4 miliar rupiah. Sedangkan, berdasarkan data potensi desa (PODES), terdapat sekitar 12 286 industri yang merupakan industri kecil sampai besar yang keberadaannya menyebar di wilayah Kabupaten Malang yang terdiri dari industri kulit, industri kayu, industri logam mulia dan bahan dari logam, industri anyaman, industri gerabah/keramik/batu, industri dari kain/tenun, industri makanan dan minuman dan industri lainnya.

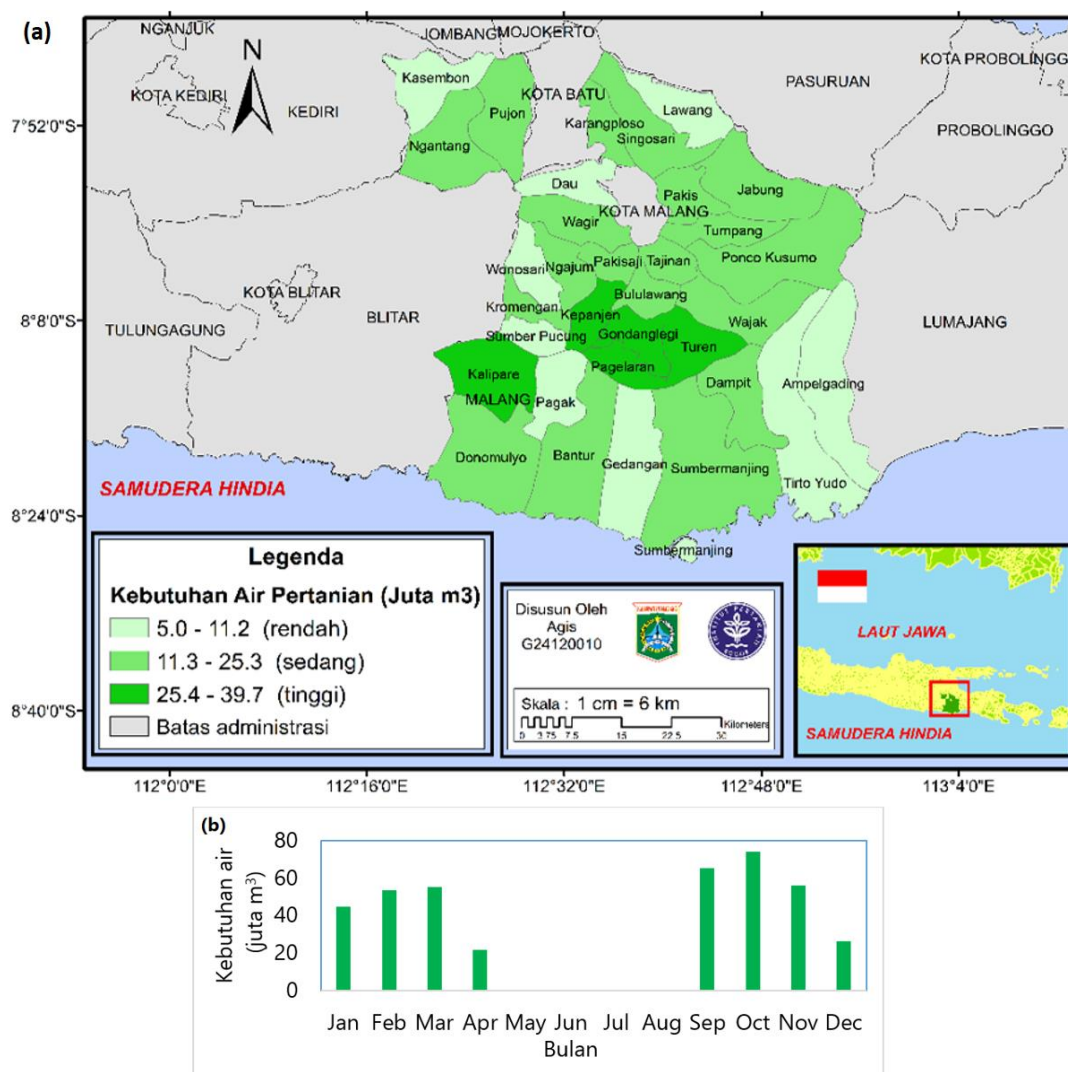
Pertanian merupakan sektor andalan perekonomian Kabupaten Malang. Menurut Dinas Pertanian dan Perkebunan, lahan pertanian di kabupaten malang terdiri dari sawah (29.6%), ladang (58.7%) dan perkebunan (11.7 %). Khusus untuk area sawah sudah merupakan lahan sawah yang teririgasi. Fasilitas jaringan irigasi meliputi bendungan tetap, bangunan air, sumber air, pintu air dan saluran

pembawa air yang diperuntukkan untuk mencukupi kebutuhan pengairan lahan sawah. Namun demikian, sistem irigasi tidak mampu meningkatkan produksi khususnya tahun 2014, produksi pertanian mengalami penurunan dibandingkan tahun sebelumnya.

Kebutuhan Air Sektor Pertanian

Sektor pertanian merupakan sektor dengan kebutuhan air paling tinggi dibandingkan dengan kedua sektor lainnya. Secara total kebutuhan air untuk sektor pertanian adalah 608 juta m^3 /tahun untuk memenuhi kebutuhan lahan sawah dengan luas 49 593 hektar yang tersebar pada 33 kecamatan di Kabupaten/Kota Malang.

Kebutuhan air untuk pertanian memiliki nilai yang beragam pada tiap kecamatan karena masing-masing kecamatan karena perbedaan luasan lahan pertanian khususnya sawah (Gambar 2a). Kebutuhan air tertinggi mencapai 39.74 juta m^3 /tahun yang terdapat pada Kecamatan Gondanglegi dengan luas lahan sawah 3 245 hektar, sedangkan kebutuhan air terendah terdapat pada Kecamatan Ampelgading dengan kebutuhan air 5.04 juta m^3 /tahun yang luas lahan sawahnya 407 hektar. Secara rata-rata, sektor pertanian membutuhkan air sebesar 18.44 juta m^3 /tahun/kecamatan untuk 3 kali musim tanam.



Gambar 2 Kebutuhan air tahunan sektor pertanian di Kabupaten Malang: (a) peta sebaran kebutuhan air tiap kecamatan, dan (b) variasi kebutuhan air tiap bulan.

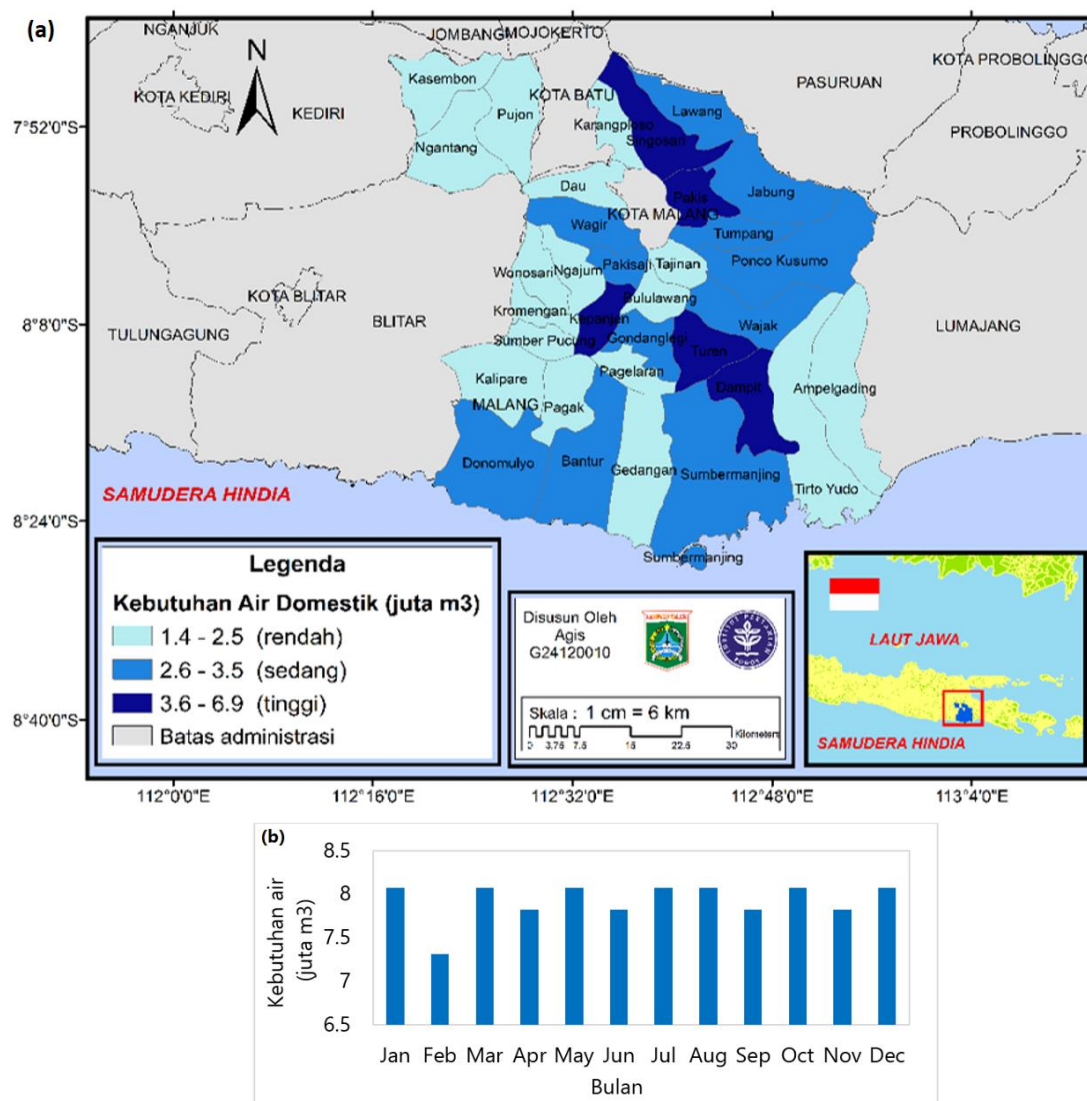
Kebutuhan air sektor pertanian secara rata-rata sebesar 33 juta m^3 setiap bulan. Pada bulan Mei sampai Agustus lahan pertanian tidak memerlukan air karena pada bulan-bulan tersebut biasa ditanam dengan tanaman pramusim seperti palawija dan kacang-kacangan yang tidak memerlukan air irigasi, namun sumber air langsung berasal dari curah hujan

(Gambar 2b). Kebutuhan air tertinggi pada bulan September–Oktober mencapai 65 sampai 74 juta m^3 /bulan, karena bulan tersebut merupakan awal musim tanam dan juga pada periode awal musim hujan sehingga jumlah curah hujan masih belum mencukupi keseluruhan kebutuhan air untuk irigasi.

Selain itu pada bulan kedua dan ketiga di setiap musim tanam membutuhkan banyak air dibandingkan dengan bulan pertama dan keempat, hal ini disebabkan pada bulan kedua dan ketiga merupakan fase transisi dari vegetatif ke generatif, yaitu saat padi mengalami fase reproduktif (inisiasi malai-bunting-pembungaan) dan saat fase inilah kebutuhan air tanaman padi berada pada titik yang kritis atau sangat tinggi. Sedangkan pada bulan pertama kebutuhan air tidak terlalu tinggi disebabkan bulan tersebut merupakan awal fase vegetatif dan pada bulan keempat merupakan fase pemasakan untuk persiapan panen sehingga kebutuhan air sangat rendah (Jensen dan Allen, 2016). Hal ini sejalan dengan data yang diperoleh dari BAPPENAS yang menunjukkan bahwa jumlah kebutuhan air irigasi tertinggi terjadi pada bulan-bulan kemarau seperti September, Oktober dan November (SON), yaitu berkisar antara 50-150 juta m^3 /bulan (BAPPENAS, 2010).

Kebutuhan Air Sektor Domestik

Kebutuhan air sektor domestik di Kabupaten Malang dari tahun 2010-2014 menunjukkan nilai antara 84-102 juta m^3 /tahun atau 7.0–8.5 juta m^3 /bulan. Hal ini sejalan dengan kajian dari BAPPENAS yang menyebutkan kebutuhan air domestik rata-rata pertahun untuk wilayah Kota dan Kabupaten Malang hampir mencapai 146 juta (BAPPENAS, 2010). Secara umum kebutuhan air domestik terendah terdapat di Kecamatan Kasembon dengan jumlah air sekitar 1.44 juta m^3 /tahun, sedangkan kebutuhan air tertinggi berada di kecamatan Singosari dengan jumlah air sekitar 6.90 juta m^3 /tahun. Sebaran kebutuhan air domestik bulanan dihitung berdasarkan jumlah kebutuhan air harian dikalikan dengan jumlah hari pada masing-masing bulan (Gambar 3).

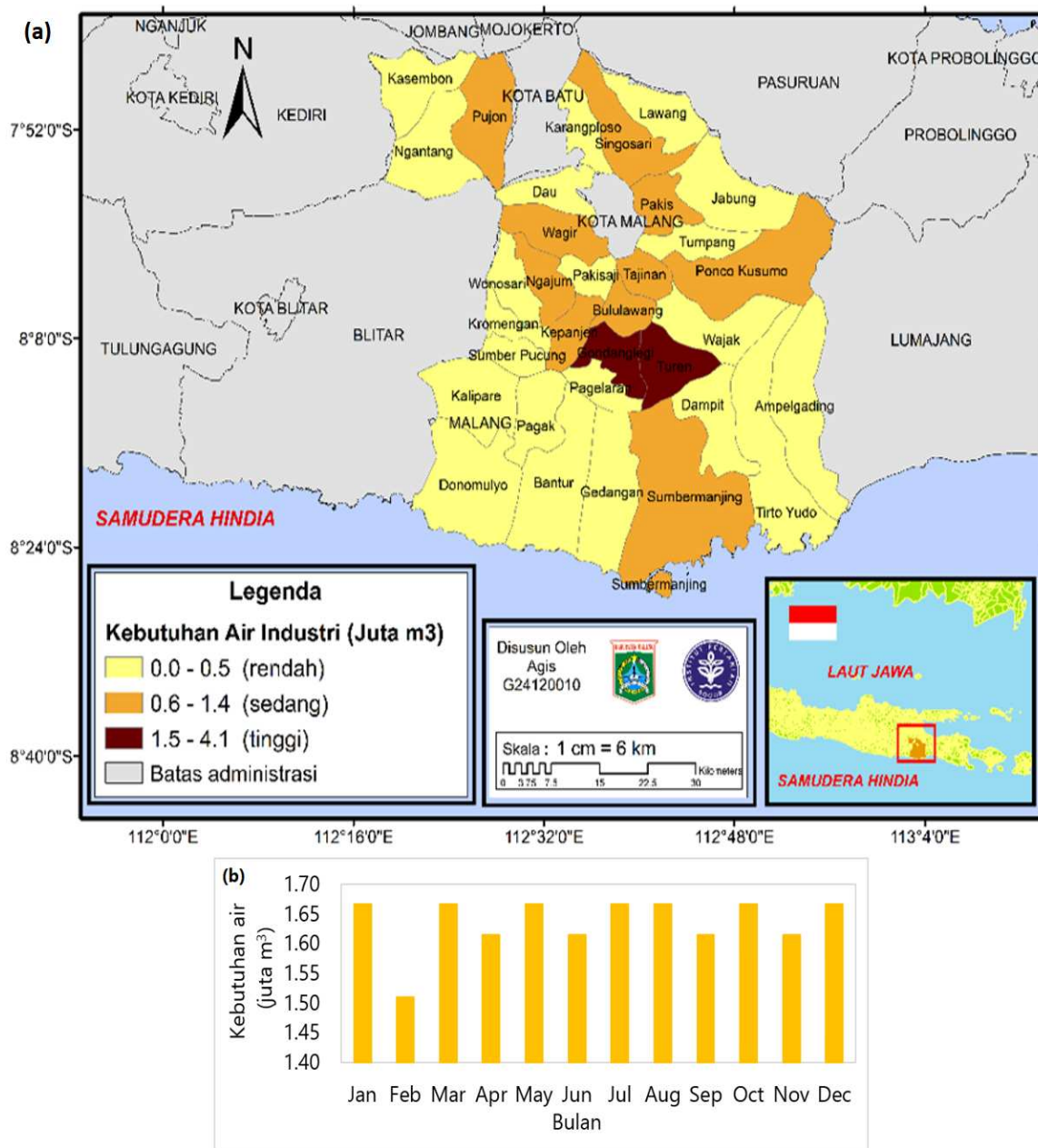


Gambar 3 Kebutuhan air tahunan sektor domestik di Kabupaten Malang: (a) peta sebaran kebutuhan air tiap kecamatan, dan (b) variasi kebutuhan air tiap bulan.

Kebutuhan Air Sektor Industri

Kebutuhan air sektor industri di Kabupaten Malang menunjukkan nilai kebutuhan air paling rendah dibandingkan sektor domestik dan pertanian. Hal ini disebabkan luas lahan bangunan industri hanya 0.21% dibandingkan pemukiman/kawasan terbangun (22.9%) maupun sawah (15.74%). Wilayah dengan kebutuhan air tertinggi yaitu kecamatan Gondanglegi, Turen dan

Poncokusumo. Kecamatan Gondanglegi paling banyak memiliki industri yaitu sekitar 1810 industri dengan bidang pengolahan gerabah/keramik/batu (Gambar 4a). Rerata kebutuhan air sektor industri mencapai 1.67 juta m³/bulan dan mencapai 15.0-19.6 juta m³ pertahun (Gambar 4b). Berdasarkan kajian yang dilakukan oleh BAPPENAS, kisaran kebutuhan air industri bulanan Kabupaten Malang adalah sekitar 0-0.5 juta m³/bulan atau sekitar 0-6 juta m³/tahun (BAPPENAS, 2010).



Gambar 4 Kebutuhan air tahunan sektor industri di Kabupaten Malang: (a) peta sebaran kebutuhan air tiap kecamatan, dan (b) variasi kebutuhan air tiap bulan.

Fungsi Manfaat Ekonomi (*Benefit Function*) Tiga Sektor

Fungsi manfaat untuk sektor pertanian, domestik dan industri dibangun berdasarkan informasi alokasi air dan nilai manfaat yang diperoleh untuk tiap alokasi air

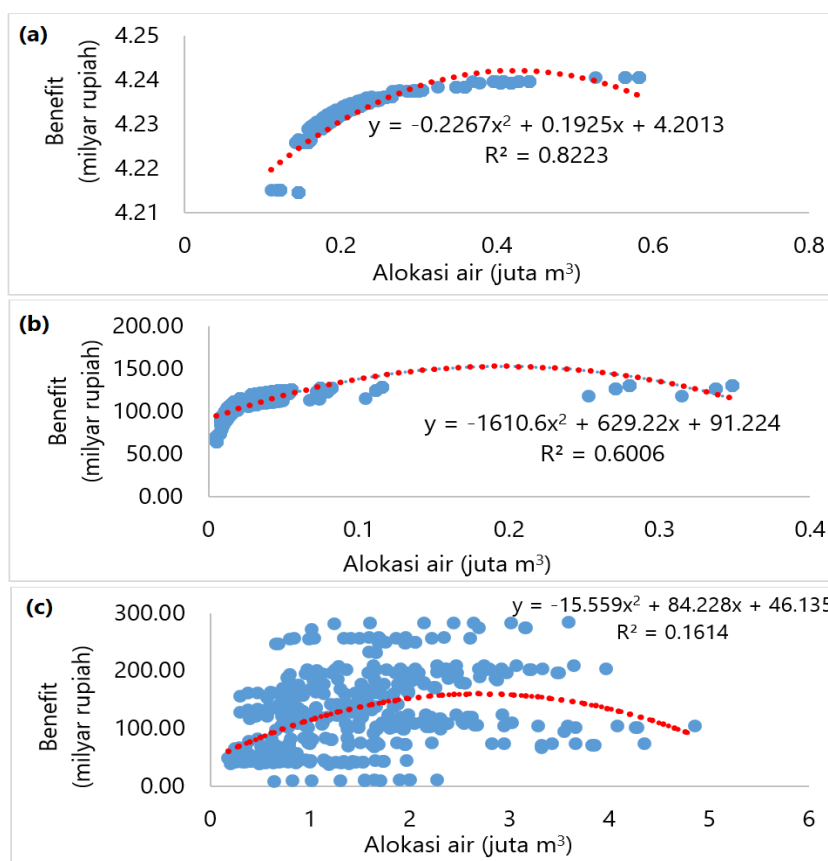
tiap sektor. Fungsi manfaat merupakan fungsi yang berhubungan dengan efisiensi alokasi sumberdaya air dan berkaitan dengan besar tingkat kesejahteraan yang dapat dihasilkan bagi seluruh pengguna (Young, 2010). Pengguna akan mengkonsumsi air sepanjang nilai

manfaat ekonomi marginal bernilai positif pada setiap unit air yang dialokasikan. Pada penelitian ini PDAM sebagai regulator, sehingga manfaat ekonomi adalah manfaat yang diterima oleh PDAM untuk setiap air yang dialokasikan. Hal berbeda pada sektor pertanian, nilai manfaat ekonomi adalah nilai manfaat yang diperoleh oleh petani. Berdasarkan hasil analisis, menyebutkan bahwa peningkatan alokasi air pada sektor domestik tidak selalu berdampak pada peningkatan manfaat yang diterima. Alokasi maksimum yang menyebabkan peningkatan manfaat secara marginal ada pada kondisi alokasi air sebesar 0.4 juta m³.

Pola yang sama juga ditunjukkan oleh alokasi air untuk sektor industri. Jumlah air yang dialokasikan oleh PDAM tidak selalu memberikan hasil yang positif dari setiap air yang dialokasikan. Nilai manfaat maksimum akan diperoleh oleh PDAM sebagai pengelola saat alokasi air untuk industri mencapai nilai 0.2 juta ton m³. Nilai manfaat yang diperoleh dari sektor industri, dalam hal ini oleh PDAM sebagai pengelola, akan mulai mengalami penurunan saat air sudah dialokasikan melebihi nilai 0.2 juta ton m³. Peningkatan nilai manfaat

marginal untuk setiap air yang dialokasikan jika alokasi masih dibawah atau sama dengan 0.2 juta m³ dan memberikan nilai manfaat marginal yang menurun jika air sudah dialokasikan melebihi nilai 0.2 juta m³. Sektor industri memberikan batasan alokasi sebesar 3 juta m³ menghasilkan keuntungan atau nilai manfaat marginal yang diterima petani mengalami peningkatan pada alokasi air dibawah atau sama dengan 3 juta m³, namun kemudian mengalami penurunan jika alokasi air telah melebihi nilai tersebut.

Berdasarkan fungsi manfaat ekonomi yang dikembangkan diperoleh bahwa nilai R² menunjukkan nilai tertinggi pada sektor domestik dengan nilai 0.82. Sedangkan nilai R² terendah terdapat pada sektor pertanian dengan nilai 0.16 atau 16% (Gambar 5a-5c). Fungsi manfaat tersebut disusun sejalan dengan hasil yang diperoleh oleh Diaz dan Brown (1997) yang menyebutkan bahwa fungsi manfaat akan berkorelasi positif dan manfaat ekonomi mampu mencapai nilai maksimum ketika jumlah air yang dialokasikan mendekati nilai alokasi yang diperlukan.



Gambar 5 Grafik fungsi manfaat ekonomi (*benefit function*) untuk: (a) sektor domestik, (b) sektor industry, dan (c) sektor pertanian.

Optimasi Alokasi Air dengan Aquarius

Alokasi air merupakan suatu kegiatan manajemen pemberian air pada waktu dan jumlah tertentu dengan didasarkan pada jumlah air yang

tersedia dan permintaan air menurut waktu, jenis dan volume yang disesuaikan pada hasil kesepakatan prioritasnya. Namun, secara fisik manajemen dan keputusan alokasi air kepada wilayah atau sektor yang

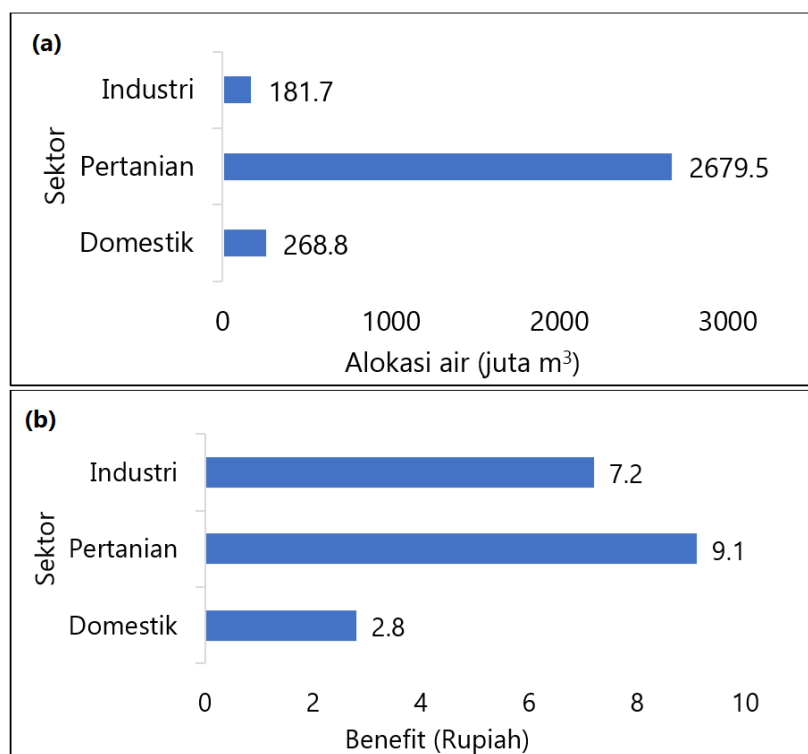
berbeda tetap akan dibebankan kepada pembuat kebijakan. Dalam hal tersebut, pemodelan alokasi air mampu memberikan kontribusi sebagai rujukan pengambilan keputusan.

Pendekatan alokasi air yang digunakan oleh model Aquarius berbeda dengan model alokasi menggunakan WEAP (Adgolign et al., 2016; Santikayasa et al., 2015) atau dengan aplikasi Soil Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 2012). Pada model Aquarius, model menghitung nilai ekonomi dari masing-masing sektor dari setiap unit air yang dialokasikan. Tujuan dari alokasi air tersebut adalah memaksimalkan nilai manfaat ekonomi (*benefit*) dari sumberdaya air tersebut (Diaz dan Brown, 1997; Rey et al., 2016). Sumber air memiliki informasi jumlah air yang tersedia sedangkan pengguna memiliki informasi tentang jumlah air yang diperlukan. Aquarius menggunakan pendekatan *dynamic programming* untuk memperoleh penyelesaian optimasi alokasi air dari keseluruhan sistem.

Hasil alokasi menunjukkan bahwa air untuk sektor domestik dan industri akan mendapatkan alokasi setiap bulan sedangkan untuk sektor pertanian air teralokasi hanya pada periode musim tanam yang memerlukan air irigasi, sedangkan periode tanam dengan tanaman palawija yang diasumsikan sebagai pola tanam tadah hujan tidak mendapatkan alokasi air irigasi. Hal ini sejalan dengan informasi yang diperoleh

dari PDAM yang menyebutkan bahwa air irigasi hanya disalurkan pada periode tanam untuk tanaman padi. Alokasi air untuk masing-masing sektor dioptimasi dengan kondisi ketersediaan air dan juga kebutuhan air saat ini (periode 2012–2015) (Gambar 6a). Total air yang teralokasi untuk keseluruhan sektor sebesar 3 130 juta m³ dengan sekitar 85.6% teralokasi untuk sektor pertanian yang diikuti oleh domestik sebesar 8.6% dan sisanya sebesar 5.8% untuk sektor industri. Hasil ini sejalan dengan data dari PDAM yang menyebutkan bahwa sektor pertanian memerlukan air yang paling banyak dibandingkan dengan sektor lain.

Total nilai manfaat ekonomi dari ketiga sektor sebesar 9.1 milyar rupiah yang merupakan komposisi sebesar 47.6% dari sektor pertanian, 37.7% dari sektor industri dan sebesar 14.7% dari sektor domestik (Gambar 6b). Sektor pertanian masih memberikan kontribusi manfaat yang paling tinggi untuk total air yang dialokasikan. Namun melihat nilai per unit air yang dialokasikan, sektor industri memberikan nilai manfaat ekonomi yang paling tinggi diikuti oleh sektor domestik dan terendah adalah sektor pertanian. Hal ini disebabkan karena pada saat ini air untuk pertanian hanya dibebankan biaya perawatan dari setiap unit air yang dialokasikan. Sedangkan untuk sektor yang lain juga dibebankan pada biaya pengelolaan air karena ada perbedaan kualitas air yang diperuntukkan untuk sektor pertanian dan kedua sektor lain.



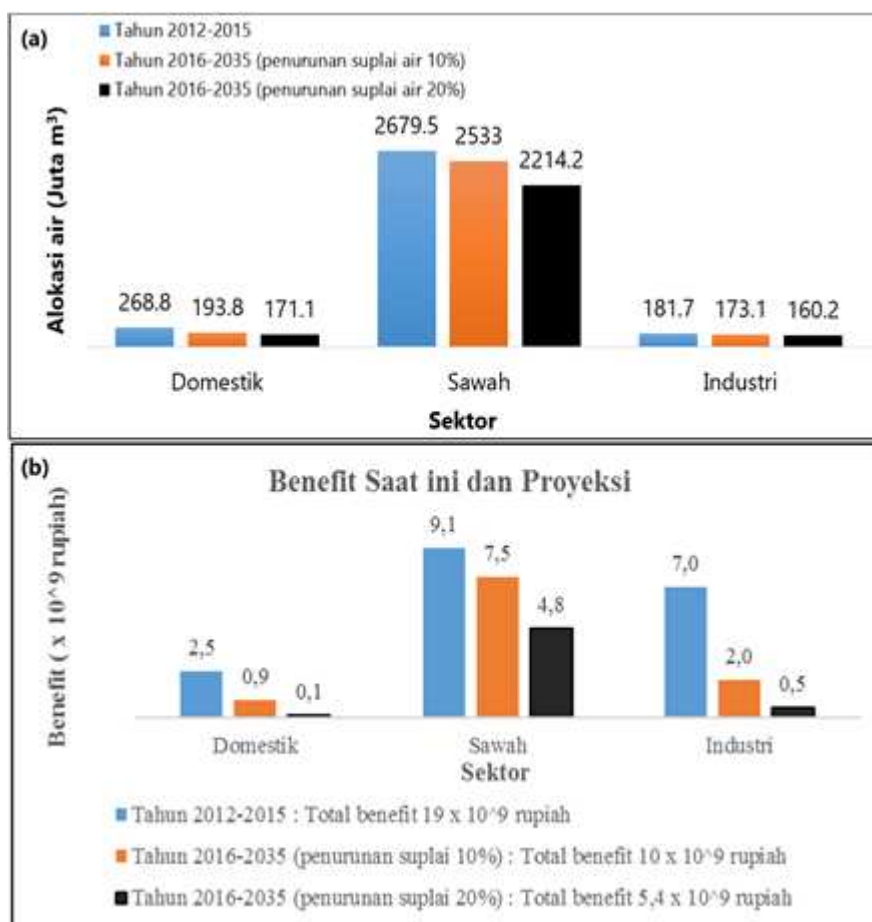
Gambar 6 Alokasi air kondisi saat ini (tahun 2012–2015) pada 3 sektor berdasarkan model optimasi Aquarius

Skenario Alokasi Air

Alokasi air merupakan proses dinamis yang dipengaruhi oleh nilai ketersediaan dan kebutuhan air. Model yang disusun untuk subDAS Ambang-Brantas kemudian diaplikasikan dengan dua skenario yang berbeda yaitu skenario perubahan pada ketersediaan air dan yang kedua adalah skenario perubahan pada permintaan/kebutuhan air. Skenario ini difungsikan untuk menguji tingkat sensitivitas model terhadap perubahan baik perubahan yang terjadi pada ketersediaan air maupun perubahan yang terjadi pada kebutuhan air.

Skenario perubahan pada ketersediaan air mengasumsikan bahwa pada periode yang akan datang akan terjadi penurunan curah hujan yang berdampak pada penurunan ketersediaan air. Pada komponen permintaan juga akan mengalami peningkatan mengingat peningkatan jumlah penduduk

pada periode yang akan datang. Untuk mengaplikasikan skenario pada model alokasi yang telah disusun, maka disusun dua skenario yaitu skenario 10% dan skenario 20%. Skenario 10% mengasumsikan bahwa pada periode yang akan datang akan terjadi penurunan ketersediaan air sebesar 10% dari kondisi saat ini, dan pada saat yang sama juga terjadi peningkatan kebutuhan air total sebesar 10% dengan distribusi yang sama pada ketiga sektor sebesar 10% dibandingkan dengan kondisi saat ini (Gambar 7a). Hal yang sama juga digunakan untuk skenario 20%. Skenario tersebut mengasumsikan bahwa pada periode yang akan datang akan terjadi penurunan ketersediaan air sebesar 20% dibandingkan dengan kondisi saat ini, dan terjadi peningkatan kebutuhan air secara keseluruhan sebesar 20% dengan proporsi yang sama untuk setiap sektor dibandingkan dengan kebutuhan air pada saat ini (Gambar 7b).



Gambar 7 Hasil prediksi model optimasi Aquarius untuk (a) kondisi air dan (b) nilai manfaat pada kondisi saat ini dan rentang tahun proyeksi (skenario penurunan suplai air 10% dan 20%) pada tiga sektor.

Hasil skenario menunjukkan bahwa model alokasi air yang dibangun dengan Aquarius yang mempertimbangkan nilai manfaat ekonomi sebagai tujuan alokasi sangat sensitif terhadap perubahan baik perubahan pada ketersediaan maupun kebutuhan air.

Pada skenario 10%, alokasi air untuk masing-masing sektor mengalami penurunan termasuk juga nilai manfaat untuk masing-masing sektor. Nilai manfaat total yang diperoleh mengalami penurunan sebesar 44.1% dibandingkan dengan nilai manfaat pada

periode saat ini. Penurunan maksimum terjadi pada sektor industri yang mengalami penurunan lebih dari 70% dibandingkan dengan kondisi saat ini. Sektor yang mengalami penurunan terendah adalah sektor pertanian dengan nilai penurunan sebesar 17%. Sedangkan penurunan sektor domestik sebesar 64% dibandingkan dengan nilai manfaat yang diperoleh pada periode saat ini.

Skenario 20% pada model alokasi mampu menurunkan total nilai manfaat sebesar 13.6 miliar rupiah. Ketiga sektor mengalami penurunan manfaat yang diterima dengan skenario 20% tersebut. Jika dibandingkan dengan kondisi saat ini, skenario 20% menyebabkan terjadi penurunan yang signifikan pada sektor domestik sehingga sektor tersebut menjadi sektor yang memiliki nilai manfaat minimum dibandingkan kedua sektor lain. Namun demikian sektor industri mengalami penurunan nilai manfaat yang cukup besar yaitu dari 7 milyar rupiah menjadi 0.5 miliar atau turun hingga mencapai 7% dari nilai manfaat semula. Penurunan manfaat ini menunjukkan bahwa PDAM sebagai regulator tetap memiliki kewajiban untuk mengalokasikan air untuk sektor domestik walaupun pada kondisi penurunan ketersediaan air dan peningkatan kebutuhan pada sektor lain.

Hasil ini sejalan dengan hasil yang diperoleh oleh (Diaz dan Brown, 1997) yang mendeskripsikan tentang penurunan alokasi air dengan peningkatan permintaan air dapat mengindikasikan bahwa alokasi air yang disuplai akan berbanding lurus dengan nilai manfaat ekonomi yang dihasilkan oleh masing-masing sektor.

KESIMPULAN

Alokasi air menggunakan pendekatan ekonomi mensyaratkan agar masing-masing sektor mampu menghasilkan nilai manfaat secara ekonomi untuk setiap air yang dialokasikan. Penggunaan sektor ekonomi sebagai tujuan alokasi menunjukkan hasil yang baik jika masing-masing sektor memiliki fungsi maksimum untuk setiap unit air yang dialokasikan.

Kabupaten Malang yang menjadi studi kasus dalam penelitian ini memiliki tiga sektor utama pengguna air yaitu pertanian, domestik dan industri. Sektor pertanian memiliki nilai kebutuhan air bulanan maupun tahunan yang sangat tinggi dibandingkan dengan sektor domestik dan industri. Berdasarkan fungsi manfaat ekonomi, sektor pertanian dan industri memiliki nilai manfaat yang maksimum ketika air yang dialokasikan mencapai korelasi positif. Dari nilai fungsi manfaat yang diperoleh, nilai tersebut menjadi input untuk dapat membuat model optimasi alokasi sumberdaya air optimum dengan menggunakan aplikasi Aquarius. Alokasi kondisi saat ini menunjukkan

bahwa air dialokasikan tertinggi untuk sektor pertanian diikuti oleh sektor domestik dan industri. Namun nilai manfaat ekonomi per unit air yang dialokasikan tertinggi adalah pada sektor industri diikuti oleh sektor domestik dan pertanian.

Skenario perubahan 10% baik pada penurunan ketersediaan air dan peningkatan kebutuhan air menunjukkan bahwa secara keseluruhan nilai manfaat ekonomi menurun hingga 44.1% dibandingkan dengan kondisi saat ini. Penurunan semakin tinggi hingga mencapai 71% akan diestimasi pada skenario penurunan ketersediaan air sebesar 20% dan peningkatan kebutuhan air pada nilai 20%. Namun demikian, secara jumlah keseluruhan air yang dialokasikan memiliki nilai yang sama atau mendekati jumlah kebutuhan air. Hal ini menunjukkan bahwa alokasi menggunakan pendekatan ekonomi untuk wilayah yang memiliki ketersediaan air tinggi menjadi kurang efektif dan alokasi air yang diperoleh adalah alokasi air yang sesuai dengan alokasi air menggunakan pendekatan ketersediaan dan kebutuhan air.

DAFTAR PUSTAKA

- Adgolign, T.B., Rao, G.V.R.S., Abbulu, Y., 2016. WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management* 2, 55–70. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0041-4>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome 300, D05109.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55, 1491–1508.
- BAPPENAS, 2010. Indonesian Climate Change Sectoral Roadmap.
- Braude, E., Hauser, S., Sinuany-Stern, Z., Oron, G., 2015. Water Allocation Between the Agricultural and the Municipal Sectors Under Scarcity: A Financial Approach Analysis. *Water Resources Management* 29, 3481–3501. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0986-y>
- Dawadi, S., Ahmad, S., 2013. Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population. *Journal of*

- Environmental Management 114, 261–275.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.015>
- Dessu, S.B., Melesse, A.M., Bhat, M.G., McClain, M.E., 2014. Assessment of water resources availability and demand in the Mara River Basin. CATENA 115, 104–114.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.017>
- Diaz, G.E., Brown, T.C., 1997. Aquarius: an object-oriented model for efficient allocation of water in river basins. Presented at the Symposium Water Resources Education, Training, and Practice: Opportunities for the Next Century, pp. 835–844.
- Dinar, S., Katz, D., De Stefano, L., Blankespoor, B., 2015. Climate change, conflict, and cooperation: Global analysis of the effectiveness of international river treaties in addressing water variability. Political Geography 45, 55–66.
<https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2014.08.003>
- Dirjen SDA, D.J.S.A., 2015. Pedoman Perencanaan Sumberdaya Air Wilayah Sungai.
- Divakar, L., Babel, M.S., Perret, S.R., Gupta, A.D., 2011. Optimal allocation of bulk water supplies to competing use sectors based on economic criterion – An application to the Chao Phraya River Basin, Thailand. Journal of Hydrology 401, 22–35.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.003>
- Ejaz Qureshi, M., Whitten, S.M., Mainuddin, M., Marvanek, S., Elmahdi, A., 2013. A biophysical and economic model of agriculture and water in the Murray-Darling Basin, Australia. Environmental Modelling & Software 41, 98–106.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.11.007>
- Flörke, M., Kynast, E., Bärlund, I., Eisner, S., Wimmer, F., Alcamo, J., 2013. Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development: A global simulation study. Global Environmental Change 23, 144–156.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.018>
- Fotakis, D., Sidiropoulos, E., 2014. Combined land-use and water allocation planning. Annals of Operations Research 219, 169–185.
<https://doi.org/10.1007/s10479-012-1080-y>
- Giordano, M., Shah, T., 2014. From IWRM back to integrated water resources management. International Journal of Water Resources Development 30, 364–376.
- Graveline, N., 2016. Economic calibrated models for water allocation in agricultural production: A review. Environmental Modelling & Software 81, 12–25.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.03.004>
- Grouillet, B., Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A., 2015. Historical reconstruction and 2050 projections of water demand under anthropogenic and climate changes in two contrasted Mediterranean catchments. Journal of Hydrology 522, 684–696.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.029>
- Hoekstra, A.Y., 2014. Sustainable, efficient, and equitable water use: the three pillars under wise freshwater allocation. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water 1, 31–40.
<https://doi.org/10.1002/wat2.1000>
- Jensen, M.E., Allen, R.G., 2016. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers.
- Li, M., Guo, P., 2014. A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties. Applied Mathematical Modelling 38, 4897–4911.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.03.043>
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. Sci Adv 2, e1500323.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Mesa-Jurado, M.A., Martin-Ortega, J., Ruto, E., Berbel, J., 2012. The economic value of guaranteed water supply for irrigation under scarcity conditions. Agricultural Water Management 113, 10–18.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.009>
- Mullick, M.R.A., Babel, M.S., Perret, S.R., 2013. Marginal benefit based optimal water allocation: case of Teesta River, Bangladesh. Water Policy 15, 126–146.
<https://doi.org/10.2166/wp.2013.004>
- Mullick, M.R.A., Babel, M.S., Yudianto, D., Prasad, K.C., Perret, S.R., Triweko, R.W., Wahid, S.M., 2015. Optimal system operation of the drops-cascading Konto system, Indonesia. Journal of Applied Water Engineering and Research 3, 105–121.
<https://doi.org/10.1080/23249676.2015.1033657>
- Ouda, O.K., 2014. Water demand versus supply in Saudi Arabia: current and future challenges AU. International Journal of Water Resources Development 30, 335–344.
<https://doi.org/10.1080/07900627.2013.837363>
- Pahl-Wostl, C., Arthington, A., Bogardi, J., Bunn, S.E., Hoff, H., Lebel, L., Nikitina, E., Palmer, M., Poff, L.N., Richards, K., Schlüter, M., Schulze, R., St-Hilaire, A., Tharme, R., Tockner, K., Tsegai, D.,

2013. Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5, 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.009>
- Pedro-Monzonís, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., Paredes-Arquiola, J., 2015. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology* 527, 482–493. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.003>
- Qiu, J., Turner, M.G., 2013. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed. *Proc Natl Acad Sci USA* 110, 12149. <https://doi.org/10.1073/pnas.1310539110>
- Ren, C., Guo, P., Yang, G., Li, R., 2016. Spatial and Temporal Analyses of Water Resources Use Efficiency Based on Data Envelope Analysis and Malmquist Index: Case Study in Gansu Province, China. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142, 04016066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000719](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000719)
- Rey, D., Pérez-Blanco, C.D., Escrivá-Bou, A., Girard, C., Veldkamp, T.I.E., 2016. Role of economic instruments in water allocation reform: lessons from Europe. *International Journal of Water Resources Development* 1–34. <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1422702>
- Rodríguez-de-Francisco, J.C., Budds, J., 2015. Payments for environmental services and control over conservation of natural resources: The role of public and private sectors in the conservation of the Nima watershed, Colombia. *Ecological Economics* 117, 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.05.003>
- Roозbahani, R., Schreider, S., Abbasi, B., 2015. Optimal water allocation through a multi-objective compromise between environmental, social, and economic preferences. *Environmental Modelling & Software* 64, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.001>
- Santikayasa, I.P., Babel, M.S., Shrestha, S., 2015. Assessment of the impact of climate change on water availability in the Citarum river basin, Indonesia: The use of statistical downscaling and water planning tools, in: *Managing Water Resources under Climate Uncertainty*. Springer, pp. 45–64.
- Su, C., Fu, B.-J., He, C.-S., Lü, Y.-H., 2012. Variation of ecosystem services and human activities: A case study in the Yanhe Watershed of China. *Acta Oecologica* 44, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2011.11.006>
- Turner, R.K., Georgiou, S., Clark, R., Brouwer, R., Burke, J.J., 2004. Economic valuation of water resources in agriculture: From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. Food & Agriculture Org.
- Vaghefi, S.A., Mousavi, S., Abbaspour, K., Srinivasan, R., Arnold, J., 2015. Integration of hydrologic and water allocation models in basin-scale water resources management considering crop pattern and climate change: Karkheh River Basin in Iran. *Regional environmental change* 15, 475–484.
- Xuan, W., Quan, C., Shuyi, L., 2012. An optimal water allocation model based on water resources security assessment and its application in Zhangjiakou Region, northern China. *Resources, Conservation and Recycling* 69, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.005>
- Young, R.A., 2010. Determining the economic value of water: concepts and methods. Routledge.
- Zhou, S., Huang, Y., Wei, Y., Wang, G., 2015. Socio-hydrological water balance for water allocation between human and environmental purposes in catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 19, 3715–3726.